

Ali Ahmad Hossaini

Moottorien valinta wakesurffauslaitteistoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan Koulutusohjelma

Insinöörityö

18.1.2018

Tekijä Otsikko	Ali Ahmad Hossaini Mottorien valinta wakesurffauslaitteiston
Sivumäärä Aika	32 sivua 18.1.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Arja Ristola
<p>Opinnäytetyö tehtiin yksityiselle tilaajalle. Insinööriyössä on pyritty selvittämään, millaisia sähkömoottoreita voidaan käyttää wakesurffaussovelluksessa. Moottoreiden tulee soveltua veden läheisyyteen ja työssä haluttiin selvittää, mitä muita tekijöitä moottorin valitsemisessa on huomioitava.</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin kirjallisuuskatsauksena. Insinööriyön tiedonlähteinä käytettiin yrityksen esityksiä moottoreista ja taajuusmuuttajista. Lisäksi käytettiin verkkodokumentteja ja muuta kirjallisuutta sähkömoottoreista. Muita lähteitä olivat D1-2012 käsikirja rakennusten sähköasennuksesta, St21,32 kortisto ja SFS-EN 60 529-standardit sekä luentomateriaalit.</p> <p>Työssä tutustuttiin ensin sähkömoottoreihin, taajuusmuuttajiin ja moottorin hyötysuhteen vaikutukseen energiakustannuksiin sekä käytiin läpi kaapelointia ja IP-luokitusta. Moottoreista ja taajuusmuuttajista kartoitettiin eri vaihtoehtoja toimivalle kokoonpanolle. Lopuksi selvitettiin kustannusarviot eri moottoreista.</p> <p>Tehtyjen laskemien perusteella huomattiin, että ABB:n oikosulkumoottori tulee edullisemmaksi kuin VEM:n. Opinnäytetyössä myös verrattiin 55-kW:n oikosulkumoottorin ja 27 kpl 3-kW:n oikosulkumoottorin kustannuseroa. Tämän laskelmien perusteella havaittiin, että 55-kW:n oikosulkumoottori kuluttaa vähemmän energiaa ja tulee halvemmaksi kuin 27 kpl 3-kW:n oikosulkumoottori.</p>	
	moottori, taajuusmuuttaja, Wakesurfing

Author(s) Title	Ali Ahmad Hossaini Choosing a Motor for a Wakesurfing Application
Number of Pages Date	32 pages 18 January 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical power Engineering
Instructor(s)	Arja Ristola, Senior Lecturer
<p>This thesis was made to a private subscriber. In the thesis work has been attempted to find out what kind of motor can be used in a wakesurfing application. The motor should be suitable near the water and the thesis try to find what else we need to consider when we want to select a motor for wakesurfing.</p> <p>The thesis was made as a literature study. The source of information mostly used in the thesis company's documents about motor and frequency convertor, electric motor books, lecture material, D1-2012 manual and the SFS-EN 60 529 standards published in Finland.</p> <p>In this work explained first important part of the electric motors and frequency converter. Was introduced about the effect of motor and efficiency on energy costs in addition was learned about IP code. At the end was solved alternatives motor to the wakesurfing application.</p> <p>Based on the calculations made, it was found that ABB's induction motor will be more economical than VEM induction motor. The thesis also compared the cost difference between the 55-kW inductor motor and 27 of the 3-kW induction motor. Based on these calculations, it was found that a 55-kW induction motor consumes less energy and becomes cheaper than 27 3-kW induction motors.</p>	
Keywords	motor, frequency converter, wakesurfing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Vaijeriwakesurffaus	1
3	Sähkömoottori	3
3.1	Tasasähkömoottori	3
3.2	Vaihtosähkömoottori	5
4	Taajuusmuuttaja	7
4.1	Taajuusmuuttajan säätötavat	8
4.2	Taajuusmuuttajan valinta	9
5	IP-luokitus	11
6	Kaapelit	12
7	Hyötysuhde	13
7.1	IE-hyötysuhdeluokitus	14
7.2	Kolmen eri hyötysuhteen moottorin vertailu	15
8	Moottorin valitseminen	16
8.1	Surffauslaitteistoon moottorin vaatimukset	17
8.2	Proomun liikuttamiseen vaatiman tehon laskeminen	17
8.3	Sähkömoottorin pyörimisnopeuden arvioiminen.	18
9	Moottorien vertailu	20
9.1	Pienten moottorien vertailu	20
9.2	55-kW moottorien vertailu	24
10	Yhden 55 kW ja useamman 3 kW moottorin vertailu	26
11	Yhteenveto	28
	Lähteet	30

Lyhenteet

A	Kappaleen märkäpinta-ala (m^2).
c_d	Muotokerroin.
DTC	Direct Torque Control, suora momentinsäätö.
d	Halkaisija.
F_v	Veden aiheuttama voima [N].
F_M	Moottorin antama voima [N].
G	Painovoima.
g	Putoamiskiihtyvyys.
I_A	Ankkuripiirin virta [A].
IP	International protection, Sähkölaitteiden vedenkestoisuutta arvioidaan kansainvälisellä kotelointiluokituksella eli IP-koodilla.
k_c	Koneen vakio, joka määräytyy koneen mekaanisten mittojen mukaan.
m	Massa [kg].
N	Noste.
n	Pyörimisnopeus [1/min].
η_m	on moottorin hyötysuhde DOL-käytössä.
η_{mt}	on taajuusmuuttajaohjatun oikosulkumoottorin hyötysuhde.
n_s	Staattorikentän pyörimisnopeus.

η_T on taajuusmuuttajan hyötysuhde.

P Teho [kW].

P_L Kuorma teho [kW].

P_N Nimellisteho [kW].

r Säde.

s Jättämä.

T Momentti [Nm].

T_A Sähköinen momentti [Nm].

T_L Kuorma momentti [Nm].

T_N Nimellismomentti [Nm].

t Aika [s].

U_A Ankkuripiirin liitinjännite [V].

v Nopeus [m/s].

ϕ Magneettikentän vuo [Vs].

ρ Veden tiheys [kg/m³].

ω Kulmanopeus [rad/s].

φ Astekulma.

η Hyötysuhde.

1 Johdanto

Suomessa lainelautailu eli surffaaminen on harvinaista ja kallista. Perinteisessä surffauksessa on paljon haasteita ja esteitä, esimerkiksi meressä surffaaminen ei ole aina mahdollista. Myös vesihiihto on kallista ja epäterveellistä hiihtäjälle sekä ympäristölle.

Insinööritö tehdään yksityisen henkilön toimeksiannosta. Hän suunnittelee rakentavansa suljettuun altaaseen surffausradan, joka tulee edullisemmaksi ja ympäristöystävällisemmäksi kuin luonnon vesissä surfaus. Tilaaja pyysi selvittämään eri moottorivaihtoehtoja, jotka sopisivat projektiin. Tavoitteenani on etsiä projektiin sopivat moottorit ja taajuusmuuttajat.

Insinööritöissä käsitellään eri moottorivaihtoehtoja wakesurffaussovellukselle. Laitteistossa moottorit liikuttavat noin kaksi tonnia painavaa proomua suljetussa altaassa. insinööritöissä tutustutaan erilaisiin moottoreihin ja niihin liittyviin ominaisuuksiin sekä tutkitaan eri taajuusmuuttajia tähän sovellukseen. Tarkoituksena on selvittää moottorien toimintaa ja saada käsitys oikosulkumoottorien hyötysuhteista ja niiden avulla saavutettavista säästöistä. Työ keskittyy pääasiassa oikosulkumoottoreihin.

Nykyään energiatehokkuus ja ekologisuus ovat arvoja, jotka pyritään ottamaan huomioon moottoria hankittaessa. Tekniikan kehittyessä moottorien hyötysuhteet ovat parantuneet. Hyötysuhteen parantamisella säästetään luontoa pitkällä aikavälillä ja samalla energiakustannukset pienenevät.

2 Vaijeriwakesurffaus

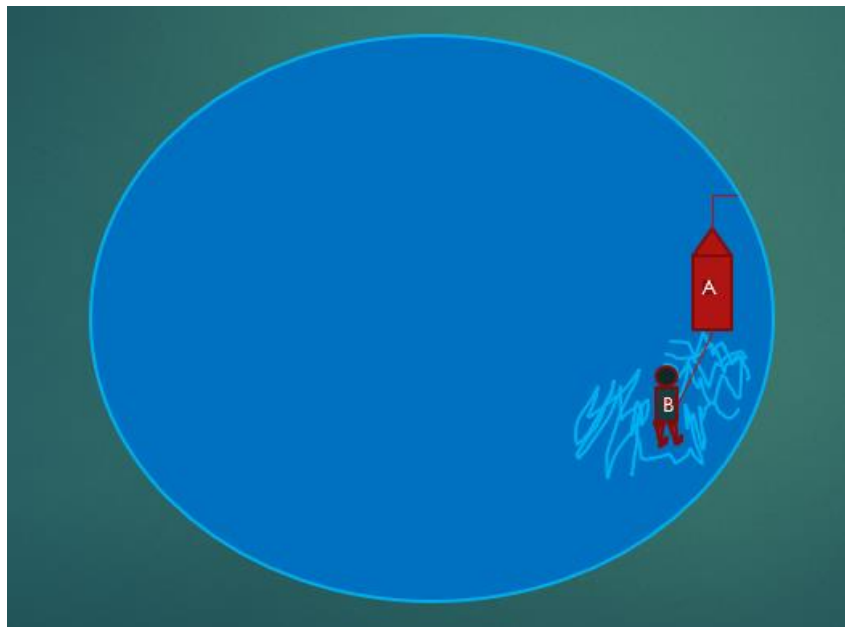
Suomessa surffauspaikkoja on vähän ja surffaus on kallista. Perinteisessä surffaamisessa on paljon haasteita ja esteitä. Suomessa pystytään surffaamaan Saimaalla. Saimaalla surffaaminen on harvinaista ja surffaamaan päästään vain noin kymmenenä päivänä vuodessa. Surffaamiseen tarvitaan vähintään kymmenen metriä sekunnissa puhaltavat tuulet eikä Saimaalla ole aina niin voimakasta tuulta. Saimaalla surffaaminen edellyttää sitä, että on seurattava sääennusteita jatkuvasti.

Toinen vaihtoehto on tehdä aaltoja veneen avulla. Sopiva aalto syntyy, kun venettä ajetaan 15–20 km/h vauhdilla. Vesihiihtäjää vedetään moottoriveneen perässä.

Tässä menetelmässä on paljon huonoja puolia:

- Moottorivene käyttää bensiiniä 35–50 l/h.
- Epäympäristöystävällinen, CO_2 -päästöjen takia.
- Moottoriveneen aiheuttama melu ja pakokaasut vaarantavat vesihiihtäjän terveyden.
- Toisen vesihiihtäjän aalto häiritsee muita vesihiihtäjiä ja sama toisinpäin.
- Moottorivene ja bensiini tekevät vesihiihdosta kalliin aktiviteetin.
- Huono sää kuten tuuliset ja sateiset päivät häiritsevät.

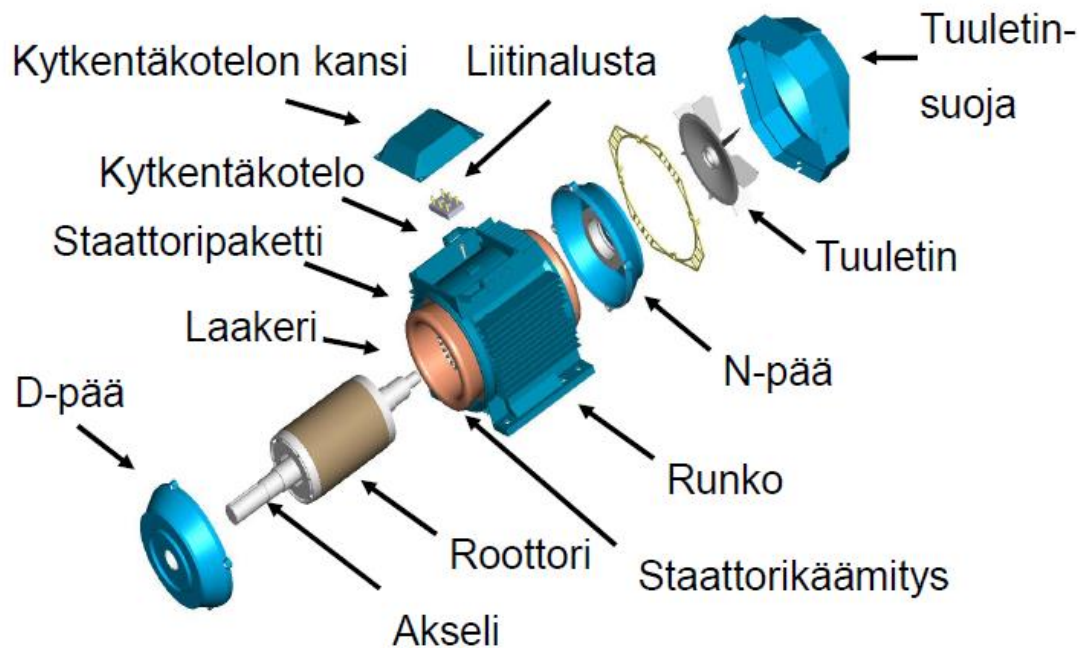
Tilaa suunnittelee tekevänsä wakesurffauksesta edullisempaa ja ympäristöystävällisempää kuin perinteinen vesihiihto. Hänen suunnitelman mukaan surffaaminen tapahtuu suljetulla alueella, johon rakennetaan ympyrän muotoinen vaijerirata. Sähkömoottorit liikkuvat vaijeria 17-20 km/h nopeudella. Vaijeriin kiinnitetty puomi vetää venettä ja vene tekee peräaaltoja. Kuvassa 1 näkyy vaijerirata. [1.]



Kuva 1. Vaijerirata. A on puomi; B on wakesurffaaja.

3 Sähkömoottori

Sähkömoottori on laite, jolla sähköinen teho muunnetaan mekaaniseksi tehoksi. Sähkömoottorit jaetaan sähkön tyyppin perustella kahteen ryhmään, vaihto- ja tasasähkömoottoreihin. Moottoreiden nopeutta ja momenttia voidaan säätää halutulla tavalla. Säättäminen onnistuu taajuusmuuttajan avulla tai ilman sitä. Kuvassa 2 on esitetty oikosulkumoottorin osat.



Kuva 2. Oikosulkumoottorin osat [26, s. 5.]

3.1 Tasasähkömoottori

Tasasähkö- eli DC-moottorit ovat olleet helposti säädettäviä ja suosittuja moottoreita. Niiden toiminta perustuu pyörivän kommutaattorin hyödyntämiseen. Tasavirtamoottorit toimivat tasavirralla ja niitä on eri tehoisia. Esimerkiksi lasten leikkikaluissa käytetään muutaman mW:n tehoisia moottoreita ja taas junissa on käytetty usean megawatin tehoisia moottoreita. DC-moottorin pyörimisnopeus on verrannollinen ankkuriin liitettävään jännitteeseen ja vääntömomentti virtaan. Esimerkiksi kasvattamalla jännitettä tai säätämällä magnetointia voidaan pyörimisnopeutta nostaa ja virralla momenttia seuraavien yhtälöiden mukaisesti. [2, s. 35– 41; 3, s. 1– 35.]

$$n = \frac{U_a}{k_c \phi} \quad (1)$$

k_c on koneen vakio, joka määräytyy koneen mekaanisten mittojen mukaan
 U_A on ankkuriin liitinjännite
 n on pyörimisnopeus
 ϕ on magneettikentän vuo.

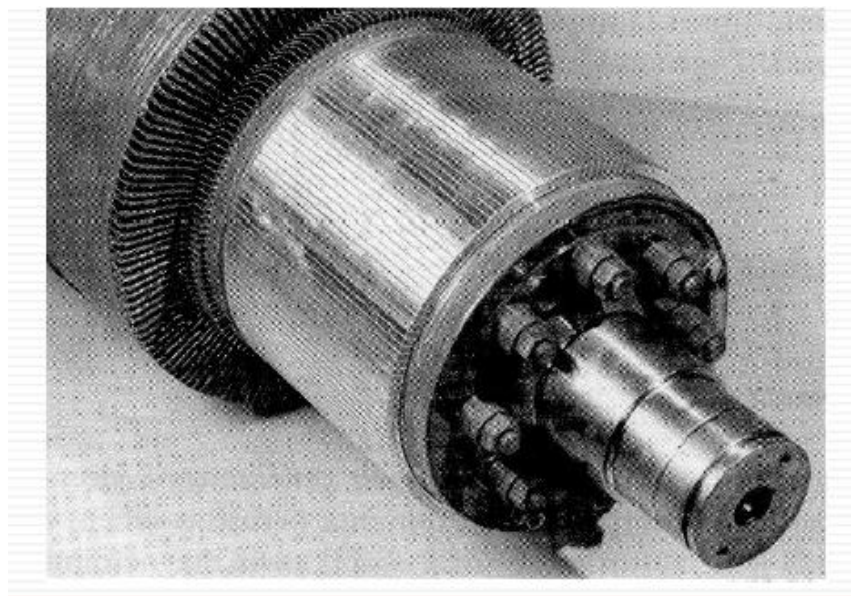
Moottorin tuottama sähköinen momentti T_A on laskettavissa seuraavasti

$$T_A = k_c \phi I_A \quad (2)$$

I_A on ankkuriin virta.

Tasavirtakoneen ohjaus tapahtuu tehoelektroniikalla ja on hyvin yksinkertaista. Vaihtosähköverkon jännitettä voidaan suunnata tasasuuntaussillalle tai hakkuriteholähteellä. Säättämällä jännitettä voidaan ohjata kuormituspiirissä kulkevaa virtaa ja voidaan säätää siten vääntömomenttia ja myös nopeutta. DC-koneet jaetaan magneettikentän perusteella sivuvirta-, sarja-, yhdysvirta- ja vierasmagneetoituihin koneisiin. [2, s. 35– 41; 3, s. 1– 35.]

DC-koneiden huonoja puolia ovat monimutkainen ja kallis roottorin rakenne ja roottorissa oleva kommutaattori. Kommutaattoria pitää huoltaa säännöllisesti, mikä tulee kalliiksi. DC-moottorin hyviä puolia taas ovat täysmomentti nollanopeudesta, suuri kentänheikennysalue ja laaja säätömahdollisuus. Kuvassa 3 näkyy kommutaattori. [2, s. 35– 41; 3, s. 1– 35.]



Kuva 3. Kommutaattori [3, s. 6.]

3.2 Vaihtosähkömoottori

Vaihtosähkömoottorin toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään ja magneettikentässä virralliseen johdinsilmukkaan. Vaihtosähkömoottorit voidaan jakaa kahteen ryhmään: tahti- ja epätahtimoottoreihin. Tahtimoottorin roottori pyörii staattorin kehittämän magneettikentän kanssa samalla nopeudella. Epätahtimoottorin roottori on jäljessä jättämän verran staattorin kehittämästä magneettikentästä. Moottorin sähköverkosta otama sähköteho eli syöttöteho lasketaan kaavalla 3. [4, s. 34– 39; 5, s. 7– 8.]

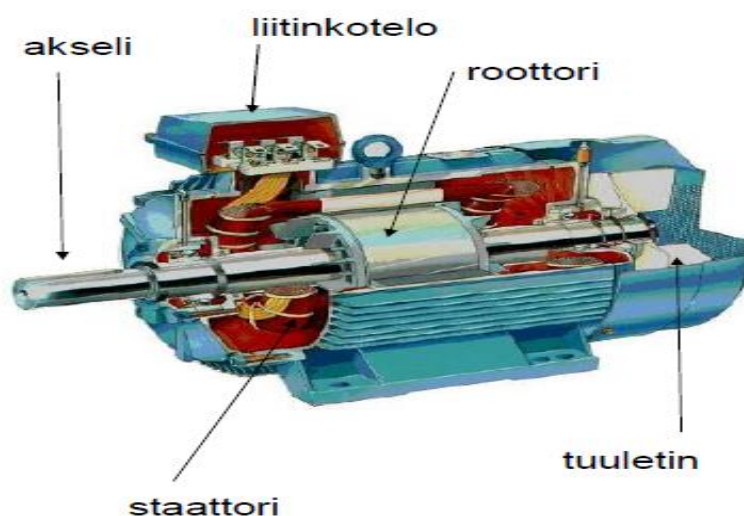
$$P_{\text{Syöttö}} = \sqrt{3} * U * I * \cos(\varphi) \quad (3)$$

Moottorin antama mekaaninen teho eli lähtöteho saadaan vähentämällä sähkötehosta moottorin häviöt kaavalla 4.

$$P_{\text{Lähtö}} = T * 2\pi * \frac{n}{60} \quad (4)$$

Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on epätahtikone, joka toimii vaihtosähköllä. Oikosulkumoottorilla on yksikertainen rakenne ja hyvä kestävyys sekä se on edullinen. Nämä ominaisuudet ovat johtaneet siihen, että oikosulkumoottori on teollisuudessa yleisin sähkömoottorityyppi ja niitä löytyy eri tehoisia. Kuvassa 4 on esitetty oikosulkumoottorin osat.



Kuva 4. Oikosulkumoottori [26, s. 5.]

Oikosulkumoottori voi toimia moottorina sekä generaattorina, mutta enimmäkseen sitä käytetään moottorina. Oikosulkumoottorin tärkeimmät osat ovat staattori ja roottori. Oikosulkumoottorin toiminta perustuu siihen, että sähköteho viedään koneen roottoriin sähkömagneettisen induktion avulla. Yksinkertaisesti oikosulkumoottorin toiminta on ymmärrettävissä niin, että vaihtovirtaa syötetään staattorikäämitykseen, mikä aiheuttaa pyörivän magneettivuon. Staattorin luoma magneettivuo leikkaa roottorin oikosuljetun häkkikäämityksen sauvoja. Tällöin roottorisauvoihin indusoituu virtaa ja se magnetoi roottorin. Roottorivirran ja staattorikentän välille syntyy voimavaikutus, joka pyörittää roottoria. Jos syntyvä vääntömomentti on suurempi kuin kuormamomentti, roottori lähtee liikkeelle. Oikosulkumoottorin roottori pyörii vähän hitaammin kuin staattorikentän magneettivuo. Tämän seurauksena oikosulkumoottorilla on jättämä. Oikosulkumoottorin jättämä on laskettavissa kaavan 5 mukaisesti. [4, s. 34– 39; 5, s. 7–8.]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

n_s on staattorikentän pyörimisnopeus

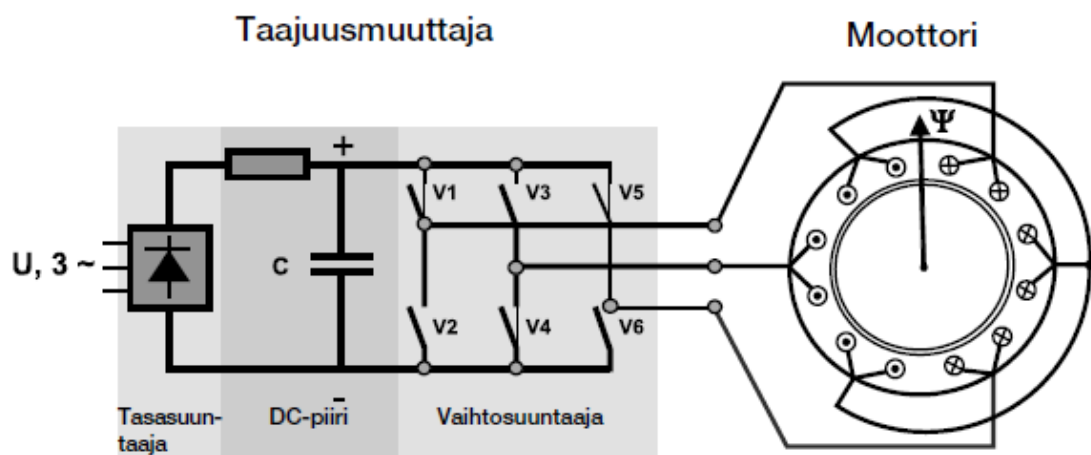
(5)

Tahtimoottori

Tahtimoottoreissa roottori pyörii täsmälleen staattorikentän nopeudella. Sen takia tahtimoottorin pyörimisnopeuden säätäminen on tarkempaa kuin epätahtimoottorin. Tahtikoneen roottoria magnetoidaan tasavirralla. On olemassa harjattomia tahtikoneita, joissa käytetty tekniikka on haastava ja myös kallis. Tahtimoottorin staattorin rakenne on samalainen kuin epätahtimoottorin staattori. Tahtimoottorit jaetaan kahteen ryhmään roottorirakenteen perusteella umpi- ja avonapamoottoreihin. Tahtikone voi toimia moottorina sekä generaattorina, mutta enimmäkseen niitä käytetään generaattoreina. Moottorina käytetään silloin, kun kyse on suurista tehoista, esimerkiksi laivamoottoreina ja kaivos-hissisovelluksissa moottoreina on käytetty vierasmagneetoituja tahtimoottoreita. [6, s.56–58.]

4 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on sähkölaite, joka muuttaa syöttävän verkon jännitteen taajuutta ja amplitudia. Taajuusmuuttajan avulla saadaan sähkömoottorin pyörimään halutulla nopeudella. Ilman taajuusmuuttajaa moottori pyörii syöttävän verkon taajuuden mukaisella nopeudella ja säätämiseenkin tarvitaan muita keinoja. Taajuusmuuttajan avulla muun muassa säästetään sähköä. Kuvassa 5 näkyy taajuusmuuttajan kaavio. [7, s.101– 113.]



Kuva 5. Taajuusmuuttajan kaavio. [27, s.12.]

Taajuusmuuttaja jaetaan rakenteen perustella kahteen tyyppiin, välipiirittömiin ja välipiirillisiin taajuusmuuttajiin. Välipiirillissä taajuusmuuttajissa verkon vaihtojännite muunnetaan ensin tasajännitteeksi ja sen jälkeen vaihtosuuntaajalla halutun mukaiseksi vaihtojännitteeksi. Välipiirittömissä taajuusmuuttajissa verkon taajuuden muuntaminen tapahtuu suoraan. Taajuusmuuttajan välipiirissä on kondensaattori ja joissakin taajuusmuuttajissa myös kelakin, joiden tehtävä on suodattaa tasajännitettä. [7, s.101– 113.]

Taajuusmuuttajien pitää täyttää IEC/SFS-EN 6100-3-12 -standardin vaatimukset. Tämä eurooppalainen standardi asettaa tiukat rajat sähköverkkoon liitettyjen laitteiden aiheuttamille yliaaltoviralle.

Harmoniset yliaallot ovat sähköverkon saastetta. Ne voivat aiheuttaa ongelmia, kuten valojen välkkymistä, tietokoneiden vikaantumista ja sähkölaitteiden ylikuumentumista.

4.1 Taajuusmuuttajan säätötavat

Energian siirto tapahtuu prosessin aikana moottorin akselin kautta. Moottorin akselin tilaa kuvaa kaksi fysikaalista suuretta, momentti ja nopeus. Energiaa siirrettäessä moottorin akselin kautta säädetään näitä suureita.

Ensimmäiset säädettävät moottorit olivat tasavirtamoottoreita, koska niiden momentti- ja nopeussäätö oli helppoa ja voitiin tehdä ilman tehoelektroniikkaa. Tehoelektroniikan kehittyessä on tullut mahdolliseksi säätää vaihtovirtamoottoreitakin. Vaihtovirtamoottorille yleisimmät säätötavat ovat skalaarisäätö, vektorisäätö ja suora vääntömomentin säätö DTC (Direct torque control).

Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaariohjauksen säätösuureet ovat jännite ja taajuus. Tässä menetelmässä muutetaan taajuusmuuttajan lähtötaajuutta ja lähtöjännite on riippuvainen lähtötaajuudesta. Skalaariohjauksessa ei ole takaisinkytkentää eikä momenttia säädetä. Sen vuoksi skalaariohjaus on edullista ja sopii sovelluksiin, joissa ei tarvita tarkkaa säätöä, kuten pumpuihin ja puhaltimiin. Skalaariohjauksessa kuorma määrää moottorin momentin. Skalaariohjauksen haitat ovat: [7, s.84– 85.]

- Momenttia ei säädetä.
- Moottorin tilaa ei huomioida.
- Modulaattori hidastaa reagointia.

Vektorisäätö

Vektorisäädössä on tarkoitus ohjata käämivuota ja vääntömomenttia erikseen toisistaan. Vektorisäädössä voidaan ohjata oikosulkumoottoria muutostilanteissakin. Oikosulkumoottoreissa ei ole ulkoista magnetoivaa virtaa. Oikosulkumoottorissa syötetään staattoriin vääntömomentin tuottama virta sekä magnetoiva virta. Vektorisäädössä mitataan taajuusmuuttajan avulla moottorin ottamat vaihevirrat. Vektorisäätö perustuu moottorin kaksiakselimalliin. Kaksiakselimallissa moottorin virtaa kuvaavat kaksi virtavektoria, pitkittäinen ja poikittainen. Pitkittäinen vektori kuvaa magnetoivaa virtaa ja poikittainen vektori vääntömomenttia. [7, s.85– 87.]

Vektorisäädön hyvät puolet ovat tarkka nopeudensäätö ja täysimomentti nollanopeudella. Tarkkaan nopeudensäätön tarvitaan takaisinkytkentä sekä modulaattori, joka on välttämätön. Nopeuden takaisinkytkentä on kallis ratkaisu. [7, s.85– 87.]

Suora momenttisäätö

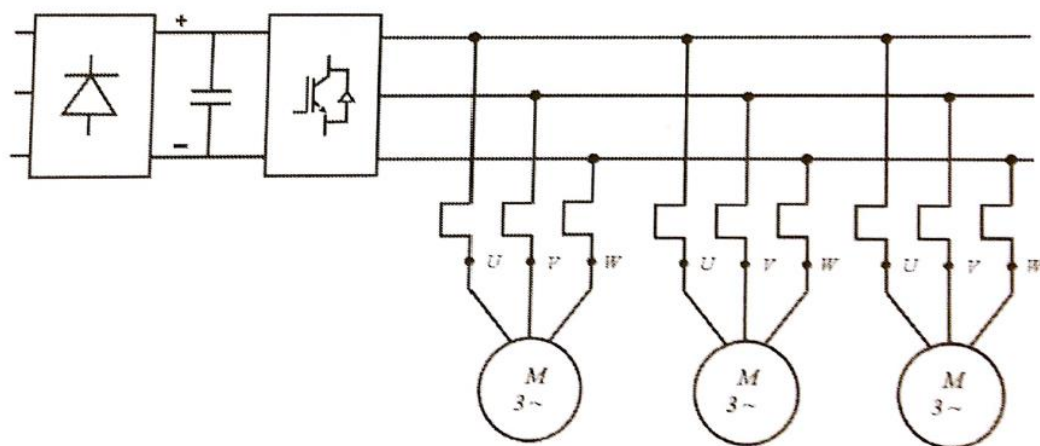
Suora momenttisäätö eli DTC on ABB:n kehittämä tekniikka ja muutamilla muilla valmistajilla on nykyään jo vastaava momentin säätö. DTC-tekniikassa säädetään suoraan moottorin käämivuota ja sitä kautta vääntömomenttia. DTC-tekniikassa hyödynnetään vuovektorisäätöä ilman takaisinkytkentää eikä modulaattoria tarvita. Takometriä tai asentoanturia ei välttämättä tarvita. [7, s.87– 89.]

Suoran vääntömomentin säädön edut:

- Ei tarvita takaisinkytkentää eikä ulkoista magnetointia tai modulaattoria.
- Momenttivaste on jopa kymmenen kertaa nopeampi kuin perinteisissä vaihtovirta- tai tasavirtakäytöissä.
- Dynaaminen nopeustarkkuus on kahdeksan kertaa parempi kuin takaisinkytkemättömillä vaihtovirtakäytöillä.

4.2 Taajuusmuuttajan valinta

Taajuusmuuttajan valinta on helppoa, jos ei ole ylikuormitustarvetta. Tällöin taajuusmuuttajan valinta tapahtuu verkkojännitteen ja valmistajan ilmoittaman moottorin akselitehon perusteella. Yleensä yhdellä taajuusmuuttajalla syötetään yhtä moottoria. Yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan ohjata myös useampaa moottoria samanaikaisesti. Silloin taajuusmuuttajan teho pitää olla 10 % suurempi kuin kaikkien kytkettyjen moottoreiden yhteenlaskettu teho. Kytkentä on kuvan 6 mukainen. Tällöin jokainen moottori on suojattava omalla ylivirtasuojalla, koska taajuusmuuttaja ei tunnista jokaisen moottorin kuormitusta ja sen suojaus perustuu kaikkien moottoreiden summavirtaan. [8, s.75– 92.]



Kuva 6. Periaatekuva tapauksesta, jossa ohjataan useampaa moottoria yhdellä taajuusmuuttajalla. [8, s.78]

Taajuusmuuttajavalmistajia on satoja ja taajuusmuuttajamallistot ovat laajoja. Tärkeää on tietää, mitä taajuusmuuttajalla halutaan tehdä ja mihin tarkoitukseen sitä käytetään. Mitä paremmin taajuusmuuttaja soveltuu prosessiin, siitä enemmän voidaan saada etua.

ABB:n taajuusmuuttajat

ABB on toimittanut miljoonia taajuusmuuttajia eri puolille maailmaa yli 30 vuoden ajan. Joissakin ABB:n taajuusmuuttajissa on energiasäästöyökaluja, joiden avulla voidaan säästää jopa 50 prosenttia energiakustannuksista, kun vähennetään moottorin nopeutta ainoastaan 20 prosenttia. Vuonna 2010 nämä taajuusmuuttajat vähensivät yhdessä sähkön kulutusta noin 260 TWh. Määrä vastaa yli 65 miljoonan eurooppalaisen kotitalouden keskimääräistä vuosittaista sähkönkulusta ja päästöt vähentyvät keskimäärin yli 220 miljoona tonnia. [25, s,1– 8.]

ABB valmistaa ACS-sarjan taajuusmuuttajia. Niitä löytyy vakiotajuusmuuttajat kuten ACS580 0,75-250 kW teholuokissa tai ACS880 0,55–250 kW tehoisia. ACS880 toimii DTC tekniikalla. DTC on ABB:n kehittämä ohjaustapa. DTC:ssä säädetään momenttia ja magneettivuota. DTC:n hyvä puoli on tarkka säätö ja korkea käynnistysmomentti ja huono puoli on sen hinta, joka on korkeampi kuin tavallisilla taajuusmuuttajilla. ACS880 55-kW myyntihinta on 4510 €+alv. [9; 10; 11.]

Danfossin taajuusmuuttajat

Danfossin valikoimasta löytyy VACON 100 INDUSTRIAL teholuokissa 0,055–800 kW. VACON 100 INDUSTRIAL on hyvin monipuolinen taajuusmuuttaja, joka soveltuu moniin käyttöihin. VACON 100 INDUSTRIAL taajuusmuuttaja soveltuu hyvin käyttöihin, joissa on muuttuva momentti tai jatkuva tehon ja momentin tarve, kuten puhaltimet, pumput ja kuljettimet. VACON 100 INDUSTRIAL taajuusmuuttajissa on asennettu Safe Torque off, joka estää moottoria kehittämästä vääntömomenttia moottorin akselille ja estää näin moottorin tahattoman käynnistymisen. Lisäksi löytyy Safe stop 1 ja ATEX-sertifioitua. ATEX-sertifioitu valvoo moottorin ylikuumenemista ja katkaisee virransyötön, jos järjestelmä ylikuumenee. Kotelointiluokka on IP2-IP54, joka suojaa laitteen pölyä ja vettä vastaan. VACON 100 INDUSTRIAL 55-kW myyntihinta on 3700 euroa (+ alv). [12; 13.]

Taajuusmuuttajaa valittaessa ratkaisevat tekijät ovat hinta ja käyttötapa, esimerkiksi ohjataanko laitetta ulkoisella tietokoneella vai halutaanko, että taajuusmuuttaja hoitaa kaiken. Jos ohjataan tietokoneella tavallinen taajuusmuuttaja riittää hyvin, kuten ABB:n ACS 580 sarja. Jos taas ulkoinen tietokone ei ole käytössä, siinä tapauksessa kalliimpi ABB:n taajuusmuuttaja kuten ACS 880 soveltuu hyvin. Taajuusmuuttajan tulee täyttää kaikki projektin prosessin vaatimukset. Aina yhteensopiva taajuusmuuttaja auttaa energian säästössä ja pienentää käyttökustannuksia. ACS 880 taajuusmuuttajan toiminnan ydin on suora momentin säätö (DTC) tekniikka. Lisäksi ACS880-sarja tuottaa vähemmän yliaaltoja verrattuna taajuusmuuttajiin, joissa käytetään perinteistä diodisyöttöä. ACS880-sarjan aktiivinen syöttöyksikkö voi lisätä lähtöjännitettä tarvittaessa jopa silloin, kun syöttöjännite on alle nimellistason.

5 IP-luokitus

Sähkölaitteiden vedenkestoisuutta arvioidaan kansainvälisellä kotelointiluokituksella eli IP-koodilla (International Protection), joka on esitelty standardissa SFS-EN 60 529. Kotelointiluokkakoodi kertoo asentajalle, loppukäyttäjälle ja sähkösuunnittelijalle, mihin ympäristöön kyseinen sähkölaite soveltuu. [14, s.1– 4.]

Luokitus kertoo, miten laite on suojattu pölyä ja vettä vastaan. Kotelointiluokka alkaa IP-kirjaimella ja sen jälkeen tulee numeroita. Ensimmäinen tunnusnumero suojaa laitetta vierailta esineiltä ja pölyltä, samoin se kertoo, miten käyttäjä on suojattu koskemasta jänniteisiin osiin. Toinen numero ilmaisee sitä, kuinka hyvin laite kestää vettä. Kolmas lisäkirjain (A, B, C, D) on vapaaehtoinen ja sitä käytetään vain silloin, kun ensimmäinen numero on korvattu X kirjaimella tai todellinen kosketussuoja on parempi kuin ensimmäinen tunnusnumero esittää. Neljäs täydennyskirjaimen (H, M, S, W) on vapaaehtoinen ja ilmaisee jotain poikkeuksellista ominaisuutta. [14, s.1– 4.]

Erikoistilojen sähköasennukset vaativat lisää toimintaa. Näissä tiloissa sähköiskun aiheuttama vaara lisääntyy huomattavasti. Kun ihmisten keho on märkää, sen resistanssi pienenee. Sen takia veden läheisyydessä ja märissä tiloissa on noudatettava standardin erityisvaatimuksia. Standardissa SFS-EN 60 529 määritellään, jos alueella käytetään vesisuihkua siivoamiseen, tarvitaan kotelointiluokka IPX5. Vedenläheisyydessä sähkölaitteiden on oltava IPX5 tai IPX8, jolla varmistetaan laitteen kestävyys veteen upottamiseen aikana. [14, s.1– 4.]

6 Kaapelit

Standardissa SFS 600–1 on ohjeita johtojen ja kaapeleiden valintaan ja asentamiseen, lisäksi on otettava valmistajan asennusohjeet huomioon.

Johtimia ja kaapeleita valittaessa on otettava huomioon seuraavat seikat:

- Johdon tai kaapelin on oltava standardin mukainen.
- Kaapeleiden tai johtojen kuormitettavuus on selvitettävä, eli kaapeli tai johdon on oltava sopiva siihen järjestelmään, johon se asennetaan.
- Kaapeleiden tai johtojen nimellispoikkipinta on oltava sopiva. Kaapelin tai johdon on kestävä oikosulkuvirta siihen asti, kun johdonsuojakatkaisija tai ylivirtasuojakatkaisija katkaisee oikosulkuvirran.
- Kaapeleiden tai johtojen värien on oltava standardin mukainen.
- Kaapeleilla on oltava hyvä kestävyys. Kaapelien on kestävä mekaanista kuormitusta, vettä, ympäristön lämpötilaa ja vieraita kiinteitä aineita.

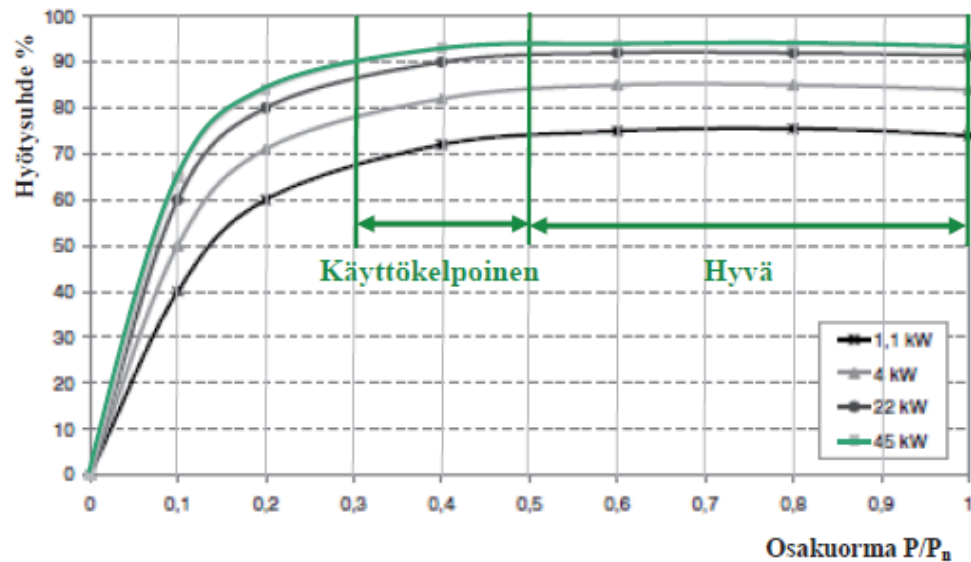
Ehdotan näitä kaapeleita tähän projektiin:

- MMJ on hyvä asennuskaapeliksi. Muovivaippainen kaapeli sopii kiinteään pinta- ja uppoasennukseen. Alin käyttölämpötila on -15 °C.
- MMO on muovipintainen ohjauskaapeli, joka sopii kiinteään pinta- ja uppoasennukseen. Suositeltava alin käyttölämpötila on -15 °C.
- MCMK on kosketussuojattu voimakaapeli, joka sopii asennettavaksi maahan sekä kiinteään asennukseen. Suositeltava alin lämpötila on -15 °C. [15, s.186–199.]

7 Hyötysuhde

Kymmeniä vuosia sitten lähdettiin puhumaan ilmaston lämpenemisestä ja kasvihuoneilmiöstä ja niiden aiheuttamista ongelmista maapallon ilmastolle. Esimerkiksi ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet ovat kasvaneet 31 % ja merenpinta on noussut noin 10 cm vuodesta 1961. Energiatehokkuus on siksi aiempaa tärkeämpää. Jatkossa on otettava nykyistä enemmän huomioon sähkökäytön energiatehokkuuden parantaminen ja käyttää enemmän sähkölaiteita, joissa on hyvä energiatehokkuus. Edellä mainituista syistä on erittäin tärkeä kiinnittää huomiota sähkömoottorin hyötysuhteeseen. Pienikin hyötysuhteen parannus vaikuttaa sähkönkulutukseen pitkällä aikavälillä ja samalla säästetään energiaa.

Paras hyötysuhde oikosulkumoottorista saadaan yleensä silloin, kun niitä käytetään 50 – 100 % nimellispyörimisnopeudella. Alle 30 – 40 % kuormalla oikosulkumoottorin hyötysuhde lähtee laskemaan jyrkästi, mutta taajuusmuuttajan käytettäessä näin ei kuitenkaan käy. Kuvassa 7 näkyy oikosulkumoottorin käyttökelpoinen hyötysuhdealue. Oikosulkumoottoria ei kannata käyttää edes taajuusmuuttajalla alle 20 Hz:n taajuuksilla, koska ottoteho ei enää laskee, vaikka taajuutta lasketaan. Koneeseen asennettu tuuletin ei pyöri tarpeeksi nopeasti eikä kykene johtamaan häviöitä koneesta ulos ja moottori ylikuumenee. Jos oikosulkumoottoria käytetään alle 20 Hz:n taajuudella pitkän aikaa, jolloin tarvitaan erillistä jäähdytystä tai on rakennettava suurempi runko moottorille, jolloin ilmalla on enemmän tilaa liikkua. [16, s. 1–11.]



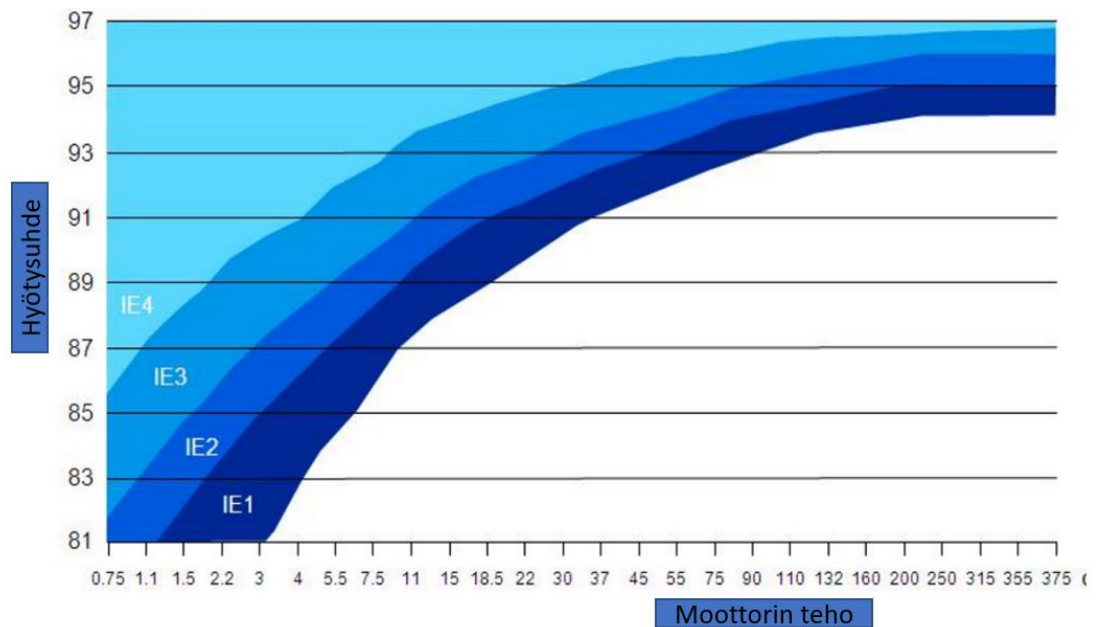
Kuva 7. Esimerkki (4-napaa.) oikosulkumoottorin hyötysuhteen alenemasta osakuormilla. [16, s.9.]

7.1 IE-hyötysuhdeluokitus

Vuonna 1998 CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) sekä Euroopan komissio sopivat 400 V, 50 Hz:n 2-ja 4-napaisille oikosulkumoottoreille hyötysuhdeluokituksen.

Vuonna 2008 IEC hyväksyi standardin IEC 60034– 30, joka tulee korvaamaan CEMEP-hyötysuhdeluokituksen maailmaanlaajuisesti. EU-komissio vaatii 16.6.2011 alkaen oikosulkumoottorien täyttämään vähintään IE2-hyötysuhdetason ja alle IE2-hyötysuhdeluokkaa ei saa käyttää, jos moottori on hankittu sen jälkeen. Tarkoitus on ollut säästää EU-alueella energia noin 132 terawattituntia vuodessa. [16, s.8– 9.]

1.1.2015 alkaen vaaditaan IE3-hyötysuhdetaso tehoalueella 0,75 – 325 kW tai IE2-hyötysuhdeluokkaa taajuusmuuttajakäyttöisiltä moottoreilta. [16, s.8– 9.]



Kuva 8. IE-luokitus on määritelty mittaustandardiin IEC 60034-2-1 [26, s. 39.]

IE1= Normaali (Standard efficiency)

IE2= Korkea (High efficiency)

IE3= Erityisen korkea (Premium efficiency)

IE4= Erittäin korkea (Super premium efficiency)

7.2 Kolmen eri hyötysuhteen moottorin vertailu

Tässä vertailussa tehdään laskelmat kolmelle saman teholuokan VEM:n oikosulkumoottorille, joilla on eri hyötysuhteet. Tarkoitus on selvittää, miten eri hyötysuhdeluokka vaikuttaa taloudellisesti. Laskennat on tehty VEM:n Energy saving calculator -ohjelmalla. Laskennoissa oletan, että moottoreita ajetaan 3000 tuntia vuodessa.

Taulukkoon 1 on koottu VEM:n Energy saving calculator -ohjelman antamat tiedot. Taulukosta nähdään, että IE3-luokan oikosulkumoottori tulee noin neljän ja puolen vuoden jälkeen halvemmaksi kuin IE1-luokka. Vaikka IE1-luokan hankintahinta on halvempi, se

kuluttaa paljon enemmän sähköä. IE3-luokan oikosulkumoottorilla energiasäästö on 534 kWh, joka tekee 48,59 € ja samalla CO_2 – päästöt vähenevät vuodessa noin 0,84 tonnia.

Taulukko 1. Moottorien vertailu eri hyötysuhdeluokkien perusteella [17; 20.]

VEM:n oikosulkumoottori 5,5kW			
Hyötysuhdetaso	IE1	IE2	IE3
Hyötysuhde η %	84,7	88,4	91,0
Nettohintaa €	1140	1310	1680
Käyttö vuodessa	3000 h/a		
Sähkö + siirto	9,1 c/kWh		
	IE1 to IE2	IE1 to IE3	IE2 to IE3
Häviöt laskevat %	27	45	25
Energiasäästö vuodessa	816 kWh	1350 kWh	534 kWh
	74,26 €	122,85 €	48,59 €
Takaisinmaksuaika	2,29 a	4,4 a	7,61a
CO2 päästö laskee	0,51 t/a	0,84 t/a	0,33 t/a

8 Moottorin valitseminen

Sähkömoottorin valitsemisessa ei ole mitään kaavaa, vaan se tehdään tietojen prosessin perusteella. Moottorin toimintavaatimukset ja tarpeet voivat muuttua moottorin elinkaaren aikana. Moottori voi olla mitoitettu jatkuvaan käyttöön kuten S1-moottorit tai moottori voidaan valita lyhytaikaisen käytön perusteella. Jatkuva käyttö tarkoittaa sitä, että moottori tuottaa tarvittavan momentin kuumenematta liikaa, vaikka se pyörisi koko ajan. Moottorin antama nimellistehon ja nimellismomentin pitää olla suurempi kuin kuormituksen vaatima teho ja momentti. Moottorin nimellismomentti ja nimellisteho lasketaan kaavoilla 6 ja 7.

$$P_N \geq P_K = P_L \quad (6)$$

$$T_N \geq T_K = T_L \quad (7)$$

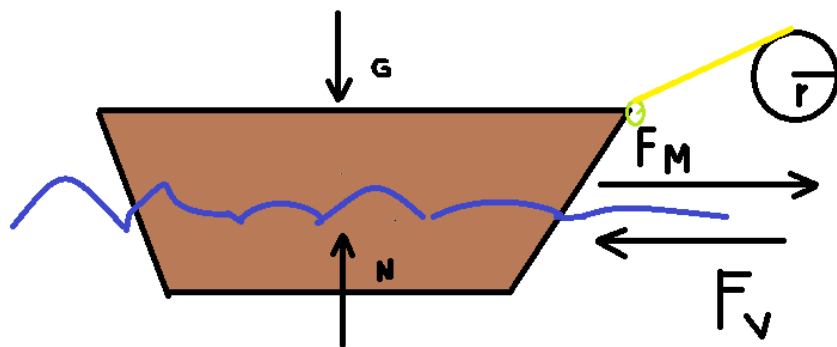
Oikean moottorin valitseminen on hyvin tärkeää. Oikein valittu moottori, oikein suojattuna ja mitoitetuna vaikuttaa suoraan moottorin tulokseen ja kustannukseen.

8.1 Surffauslaitteistoon moottorin vaatimukset

Surffaukseen tarkoitetun moottorin tulee soveltua käytettäväksi veden läheisyydessä ja sen tulee kestää mekaanista rasitusta, jonka kelluva rakennelma aiheuttaa. Merivedessä on jonkin verran suolaa, joten kaikkien asennettavien laitteiden tulee olla korroosionkestäviä. Toinen asia on se, että aaltoja syntyy jatkuvasti, joten johdotuksen tulee kestää mekaanista rasituksia.

8.2 Proomun liikuttamiseen vaatiman tehon laskeminen

Moottorilta vaaditaan suurta tehoa, että se pystyy liikuttamaan noin kaksi tonnia painavaa proomua. Proomuun on kiinnitetty noin kahden metrin puomi ja puomi on kiinnitetty vaijerilla runkoon. Rataksilla tai ketjulla yhdistetyt väkipyörät liikuttavat vaijeria. Väkipyörien halkaisija on noin 20 – 30 cm. Moottorin tulee pyörittää väkipyöriä noin 17 – 20 km/h kumpaankin suuntaan, joten moottorin ohjaus tapahtuu taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajalta vaaditaan hyvät ohjausominaisuudet, jotta se pystyy ohjaamaan automaattisesti sekä manuaalisesti. Jotta pystytään valitsemaan sopiva moottori, on otettava huomioon kaikki vastustavat voimat. Suurimman vastuksen aiheuttaa vesi, myös maan vetovoima ja ilmakitka vastustavat liikettä. Surffaus tapahtuu suljetulla alueella ja sen takia ilmanvastus jää vähäiseksi, eikä sitä tarkastella. Piirretään voimakaavio tilanteesta kuten kuvassa 9.



Kuva 9. Proomun voimakaavio.

Jotta proomu lähtisi liikkeelle, moottorista on saatava enemmän tehoa kuin kaikkien vastustavien voimien summa on. Kuvasta 9 saadaan yhtälö 8.

$$F_v \leq F_M \text{ ja } G=N \quad (8)$$

G on painovoima

N on noste

F_v on veden aiheuttama voima, joka voidaan laskea kaavalla 9.

$$F_v = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * C_d * A \quad (9)$$

ρ on veden tiheys, joka on noin 1000 kg/m^3

v on kappaleen nopeus, joka on noin 17-20 km/h

C_d on muotokerroin palkin muotoiselle kappaleelle 0,82

A on kappaleen märkäpinta-ala, joka työntää veden edestä pois

F_M on moottorin antama voima

P_L on kuorma teho

Projekti on vasta suunnitteluvaiheessa ja proomun muodosta ja koosta ei ole tarkkoja tietoja. Tässä tapauksessa moottorin teho valitaan tilaajan arvion mukaan. Tilaajan vaadittavista moottoritehosta on 55-kW.

8.3 Sähkömoottorin pyörimisnopeuden arvioiminen.

Kun moottorin teho on tiedossa, pitää vielä selvittää tarvittava pyörimisnopeus ja momentti. Tiedetään, että moottori tulee pyörittämään väkipyöriä nopeudella noin 17 – 20 km/h. Väkipyörien halkaisija $d=20 - 30$ cm. Pyörimisnopeus lasketaan kaavalla 10 ja 11.

$$\text{Ratanopeus} \quad v = \omega * r \quad (10)$$

$$\text{Pyörimisnopeus (rpm)} \quad n = \frac{60}{2\pi} * \omega \quad (11)$$

Lasketaan ensin kulmanopeus kaavalla 10, kun väkipyörän halkaisija on 20 cm. Kulmanopeus ω on vektorisuure ja kertoo kulman muutosta ajassa, hetkellisesti.

$$\text{Kulmanopeus} \quad \omega = \frac{v}{r} = \frac{\frac{20000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}}{0,1 \text{ m}} \approx 56 \text{ rad/s}$$

Kulmanopeus saatiin tulokseksi 56 rad/s . kulmanopeus muunnetaan pyörimisnopeudeksi kaavalla 11, kun väkipyörän halkaisija on 20 cm. Pyörimisnopeus kertoo, että montako kierrosta jokin moottorin akseli pyörähtää ympäri tietyssä ajassa. Koneiden pyörimisnopeus ilmoitetaan yleensä x määrä kierrosta minuutissa rpm.

Pyörimisnopeus
$$n = \frac{60}{2\pi} \omega \approx 534 \text{ rpm}$$

Momentti kuvaa voiman (F) kykyä kiertää kappaletta akselin suhteen. Momentti on vektorisuure ja se voidaan laskea kaavalla 12.

Momentti
$$T = Fr \quad T = \frac{P}{\omega} \quad (12)$$

Momentin ja pyörimisnopeuden jälkeen on selvitettävä vielä moottorin vaihteen välityssuhde. Moottorin vaihteen välityssuhde saadaan kaavalla 13 ja 14. Vaihteen välityssuhde i kertoo moottoriakselin (n_1) ja kuorman akselin (n_2) pyörimisnopeuksien suhdetta.

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (13)$$

Välityssuhde vaikuttaa myös moottoriakselien momentteihin seuraavasti.

$$i = \frac{T_1}{T_2} \quad (14)$$

Jos valitaan neljänapainen oikosulkumoottori, jonka pyörimisnopeus on 1450 rpm, vaihteen välityssuhteeksi saadaan 2,7.

Välityssuhde
$$i = \frac{1450}{534} = 2,7$$

Vastaavasti, jos valitaan kuusinapainen oikosulkumoottori, joka on kalliimpi kuin neljänapainen oikosulkumoottori, tällöin kuusinapaisen oikosulkumoottorin pyörimisnopeus on 990 rpm, vaihteen välityssuhteeksi saadaan 1,8.

Välityssuhde
$$i = \frac{990}{534} = 1,8$$

9 Moottorien vertailu

Moottoreiden vertailussa on melkein mahdotonta saada täysin yksiselitteistä vastausta, koska moottorin hankintoihin vaikuttavat monet asiat. Esimerkiksi moottorin laitteiston koko, sähkön hinta, laitteistoa moottoria varten otettu laina ja lainan korot sekä laitteiston moottorin eri valmistajien hinta. Tässä laskennassa käytetään eri valmistajien saman tehoisia koneita ja laskelmat tehdään jokaiseen koneeseen erikseen sekä selvitetään takaisinmaksuajat.

9.1 Pienten moottorien vertailu

Taulukoon 2 on koottu ABB:n ja VEM:n oikosulkumoottorin tekniset tiedot saman tehoisista moottoreista. Molemmat moottorit kuuluvat IE2-luokkaan. Vaikka ABB:lta ja VEM:ltä löytyy korkeampaakin luokkaan kuuluvia moottoreita, tässä vertailussa käytetään IE2-luokan moottoreita.

Taulukosta 2 moottoreiden arvoista huomataan, että ABB:n ja VEM:n oikosulkumoottoreiden merkittävimmät erot ovat hankintahinta ja hyötysuhde.

Taulukko 2. Moottoreiden tiedot. [20, s. 4; 18.]

Valmistaja	ABB	VEM
Moottorin teho P_N	3kW	3 kW
Momentti T	19,8 Nm	19,8 Nm
Taajuus f_N	50 Hz	50 Hz
Jännite U_N	400 V	400 V
Nopeus v_N	1450 rpm	1445 rpm
Virta I_N	6,1A	6,3 A
COS φ_N	0,79	0,79
Hyötysuhde %	86,7%	85,5%
Hinta	937 € (alv0 %)	894,00 € (alv0 %)

Laskelmassa on arvioitu moottorin käyttöajaksi kahdeksan tuntia vuorokaudessa. Surfauslaitoksen on tarkoitus toimia niin talvella kuin kesällä, siksi käyttökustannukset lasketaan kahdeksan tunnin päivittäisellä käytöllä.

Säädetyissä sähkömoottorikäytöissä oikosulkumoottorin hyötysuhde laskee. Taajuusmuuttaja aiheuttaa harmonista yliaaltoja, jotka lisäävät oikosulkumoottorin rautahäviöitä. Taajuusmuuttajaohjaus aiheuttaa pienille moottorille noin 0,5 %:n häviöt. Taajuusmuuttajaohjatun oikosulkumoottorin hyötysuhde saadaan kaavalla 15.

$$\eta_{mt} = \eta_m - 0,5 \% \quad (15)$$

η_m on moottorin hyötysuhde DOL-käytössä

η_{mt} on taajuusmuuttajaohjatun oikosulkumoottorin hyötysuhde.

Taajuusmuuttajaohjatun ABB-oikosulkumoottorin hyötysuhde on.

$$\eta_{mtABB} = 86,7 \% - 0,5 \% = 86,2 \%$$

Taajuusmuuttajaohjatun VEM-oikosulkumoottorin hyötysuhde on.

$$\eta_{mtVEM} = 85,5 \% - 0,5 \% = 85,0 \%$$

Lasketaan moottoreiden ottamat energiat verkosta yhtälön 16 avulla. ABB antaa arvion, että taajuusmuuttajan hyötysuhde on 98 %.

$$P = \frac{P_N}{\eta_T * \eta_{mt}} \quad (16)$$

P on moottorin verkosta ottama pätöteho

P_N on moottorin nimellisteho

η_m on moottorin hyötysuhde

η_T on taajuusmuuttajan hyötysuhde (98%)

Lasketaan ABB:n oikosulkumoottorin verkosta ottama pätöteho.

$$P_{ABB} = 3 \text{ kW} / (0,862 * 0,98) = 3,5 \text{ kW}$$

Lasketaan VEM:n oikosulkumoottorin verkosta ottama pätöteho.

$$P_{VEM} = 3 \text{ kW} / (0,85 * 0,98) = 3,6 \text{ kW}$$

Vastaavasti lasketaan ABB- ja VEM:n oikosulkumoottorien energiakulutukset vuodessa.

$$E_{365 \text{ vrk}_{ABB}} = P \times t = 3,5 \text{ kW} * 8 \text{ h} * 365 \text{ vrk} = 10220 \text{ kWh}$$

$$E_{365 \text{ vrk}_{VEM}} = P \times t = 3,6 \text{ kW} * 8 \text{ h} * 365 \text{ vrk} = 10512 \text{ kWh}$$

t on aika

Tässä tapauksessa yhden moottorin käyttämä energia vuoden aikana on noin 10 220 kWh ABB:n moottorille ja 10 512 kWh VEM:n moottorille.

Helsingin Energian sähkölaitoksen perussähkön hinta yrityksille, joiden käyttö on alle 3000000 kWh vuodessa, on 4,67 c / kWh (sis. alv 24 %) ja yleissiirron energiamaksu 2,67 c / kWh (sis. alv. 24 %). Hinta on tarkastettu Helsingin Energian sivuilta [21] 28.7.2017.

$$\text{Perussähkön hinta: } 4,67 \text{ c / kWh} + \text{alv. } 24\% = 5,79 \text{ c / kWh}$$

$$\text{Energian yleissiirto: } 2,67 \text{ c / kWh} + \text{alv } 24\% = 3,31 \text{ c / kWh}$$

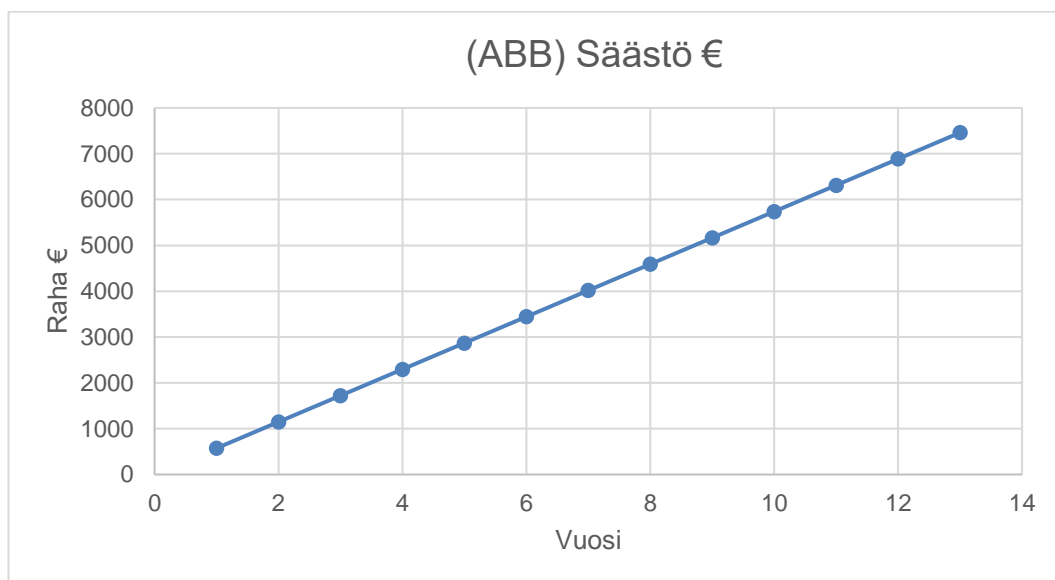
$$E_{\text{tot hinta}} = 3,31 \text{ c / kWh} + 5,79 \text{ c / kWh} = 9,1 \text{ c / kWh}$$

Tuloksena sähkön energiamaksuksi saatiin 9,1 c / kWh. Lasketaan moottoreiden välinen käytetyn sähköenergian erotus ja kustannusero vuotta kohden.

$$\begin{aligned} \text{Energian kustannusero vuodessa on } & (10512_{VEM} \text{ kWh} - 10220_{ABB} \text{ kWh}) * 0,091 \text{ €} \\ & = 21,26 \text{ €} \end{aligned}$$

Moottorien väliset hyötysuhde-erot ovat suhteellisen pienet. Taulukosta 2 nähdään, että ABB-oikosulkumoottorilla on 0,2 prosenttiyksikköä parempi hyötysuhde kuin VEM-oikosulkumoottorilla. ABB-oikosulkumoottorin 0,2 prosenttiyksikön verran parempi hyötysuhde VEM-oikosulkumoottoriin aiheuttaa 21,3 € alemmat käyttökustannukset vuodessa. Surffausssovellukseen kokonaistehon tarve on noin 55-kW. 55-kW:n moottorin ni-

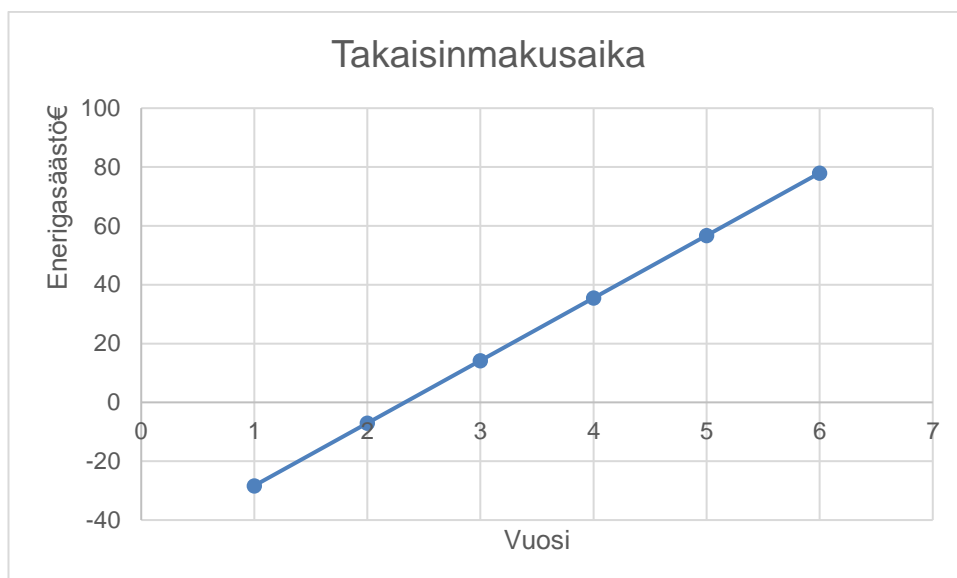
nimellismomentti on 530 Nm. Tärkeintä on saada sama nimellismomentti 3 kW-moottoreista kuin mitä 55-kW-moottori tuottaa. Jotta saadaan 530 Nm nimellismomentti, tarvitaan 27 kpl 3-kW:n moottoria. Kuvasta 10 nähdään, että näistä 27 moottorista energiansäästö vuositasolla on noin 574 €, kun käytetään ABB:n moottoria verrattuna VEM:n moottoriin.



Kuva 10. 3-kW:n ABB-oikosulkumoottorin säästö VEM-oikosulkumoottorin nähden

ABB:n 3-kW:n oikosulkumoottorin hankintahinta on 937 € + alv ja VEM:n 894,4€ + alv. ABB:n oikosulkumoottori on kalliimpi, mutta sillä on parempi hyötysuhde. Moottorin hyötysuhteen avulla säästetään energiakustannuksissa 21,26 € vuodessa moottoria kohden. Lasketaan takaisin maksuaika: kuinka kauan kestää, että ABB-oikosulkumoottori maksaa kustannuseronsa takaisin.

$$\text{takaisin maksuajat} = \frac{(937 + \text{ALV } 24\%€ - 894,4€ + \text{ALV } 24\%)}{21,26€} = \frac{(1158,16 \text{ ABB}€ - 1108,56€ \text{ VEM})}{21,26€} = 2,3 \text{ a}$$



Kuva 11. ABB:n moottorin energiasäästö ja takaisinmaksusaika.

Kuvasta 11 nähdään, että 3-kW ABB-oikosulkumoottori maksaa kustannuseronsa noin kahden vuoden jälkeen. Mutta jos moottori on käytössä enemmän kuin kahdeksan tuntia päivässä, silloin ABB:n oikosulkumoottori maksaa itsensä takaisin nopeammin ja tulee vielä edullisemmaksi kokonaiskustannuksiltaan.

9.2 55-kW moottorien vertailu

Taulukkoon 3 on kerätty ABB:n ja VEM:n moottoreiden tiedot. Tiedot on kirjoitettu vierekkäin, jotta vertailu olisi helpompaa. Vertailussa on käytetty samanlaisia moottoreita. Tarkoitus on selvittää, kumman valmistajan moottori on edullisempi hankinta. Kuten taulukon 3 arvoista huomataan moottorit eivät eroa toisistaan paljoa. Vertailussa näkyy, että merkittävät erot, kuten aiemminkin on mainittu, ovat hyötysuhde ja moottorin hinta.

Taulukko 3. Moottorien tiedot. [20, s. 4; 19.]

Valmistaja	ABB	VEM
Moottorin teho P_N	55 kW	55 kW
Momentti T	530 Nm	531 Nm
Taajuus f_N	50 Hz	50 Hz
Jännite U_N	400 V	400 V
Nopeus v_N	990 [rpm]	990 [rpm]

Virta I_N	100 A	100 A
$\cos \varphi_N$	0,83	0,85
Hyötysuhde %	93,7	93,5
HINTA	11286 € (alv0 %)	10624,00 € (alv0 %)

Näillä koneilla tehtiin samat laskemat kuin pienilläkin moottoreilla. Arvio on, että moottorit käyvät kahdeksan tuntia vuorokaudessa niin talvella kuin kesälläkin.

Taajuusmuuttajaohjatun oikosulkumoottorin hyötysuhde saadaan kaavalla 15.

$$\eta_{mtABB} = 93,7 \% - 0,5 \% = 93,2 \%$$

Taajuusmuuttajaohjatun VEM-oikosulkumoottorin hyötysuhde on.

$$\eta_{mtVEM} = 93,5 \% - 0,5 \% = 93,0 \%$$

Lasketaan moottoreiden ottamat energiat verkosta yhtälön 16 avulla

$$P_{ABB} = 55\text{kW} / (0,932 \cdot 0,98) = 60,2 \text{ kW}$$

$$P_{VEM} = 55\text{kW} / (0,93 \cdot 0,98) = 60,3 \text{ kW}$$

Lasketaan ABB- ja VEM:n oikosulkumoottorien energiakulutukset vuodessa.

$$E_{365 \text{ vrk} ABB} = P \times t = 60,2 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} \cdot 365 \text{ vrk} = 175784 \text{ kWh}$$

ABB:n 55 kW oikosulkumoottorin käyttämä energia on 175784 kWh.

$$E_{365 \text{ vrk} VEM} = P \times t = 60,3 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} \cdot 365 \text{ vrk} = 176076 \text{ kWh}$$

VEM:n 55 kW oikosulkumoottorin käyttämä energia on 176076 kWh.

Lasketaan moottoreiden välinen käytetyn sähköenergian erotus ja kustannusero vuotta kohden sekä takaisinmaksuaika.

$$\text{kustannusero} = (175784_{VEM} \text{ kWh} - 176076_{ABB} \text{ kWh}) \cdot 0,091 \text{ €} = 27 \text{ €}$$

$$\text{takaisinmaksuajat} = \frac{(11286 + \text{AIV } 24\% - 10624\text{€} + \text{ALV } 24\%)}{27\text{€}} = \frac{(13994,64 \text{€}_{ABB} - 13173,76\text{€}_{VEM})}{27\text{€}} = 30\text{a.}$$

Laskennan mukaan moottorit eivät eroa rahallisesti toisistaan merkittävästi. ABB:n moottorin hankintahinta on suurempi, mutta moottorilla on parempi hyötysuhde. Paremman hyötysuhteen kautta säästetään sähköä ja samalla energiakustannuksia. ABB:n moottorilla kestää 30 vuotta, että se maksaisi hankintahinnan eron takaisin.

10 Yhden 55 kW ja useamman 3 kW moottorin vertailu

Moottoreita hankittaessa on otettava huomioon paljon asioita. Tekniikka on yksi niistä. On selvitettävä, mihin tarkoitukseen ja missä ympäristössä moottoria käytetään. Lisäksi on otettava huomioon seuraavat asiat:

- investointikustannukset eli moottoreiden hankintahinta
- käyttökustannukset, kuten energianhinta, asennuskustannukset ja henkilöstökustannukset
- kunnossapitokustannukset ja varaosien hinnat
- keskeytymiskustannukset.

Suomessa sähkökokonaiskulutus on noin 85 TWh. Teollisuus kuluttaa yli puolet kaikesta sähköenergiasta ja sähkömoottorit kuluttaa 70 prosenttia teollisuuden käyttämästä sähköenergiasta. Tämän vuoksi korkean hyötysuhteen moottoreiden käyttöä pyritään edistämään. [28; 29.]

Tässä vertailussa yritetään selvittää, kumpi on paras vaihtoehto yksi 55-kW moottori vai useampia pieniä moottoreita.

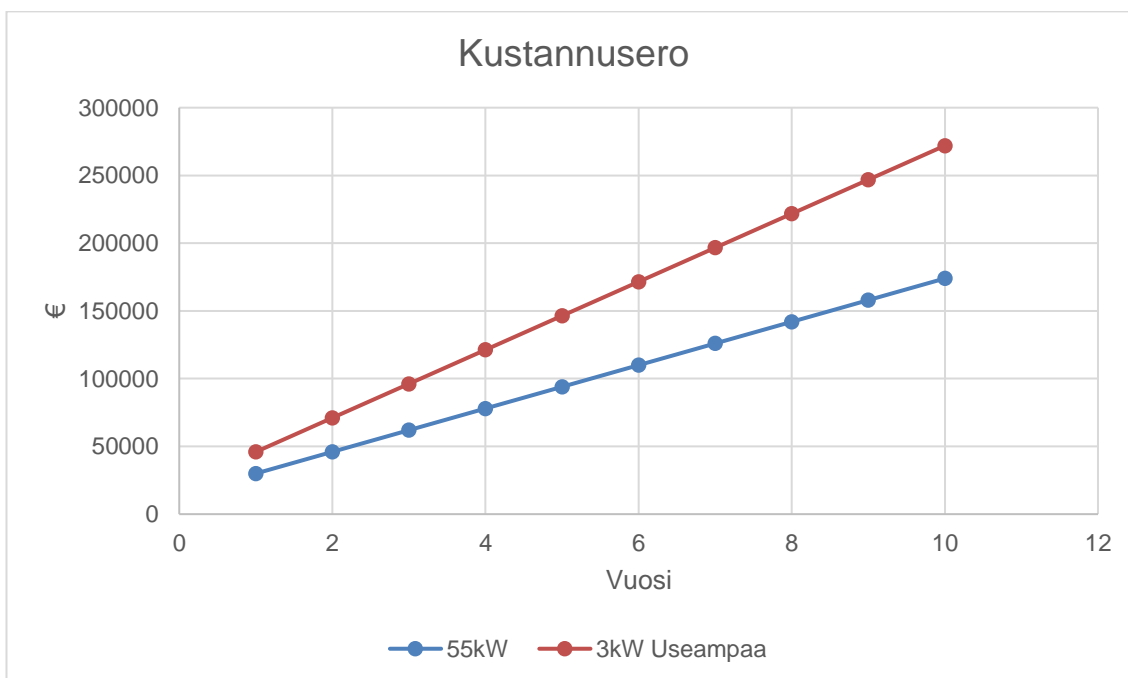
Taulukko 4. Esimerkkimoottoreiden tekniset tiedot. [18; 19.]

Valmistaja	Iso moottori (ABB)	Useampi moottori (ABB)
Moottorin teho P_N	55 kW	$27 * 3\text{kW} = 81 \text{ kW}$
Momentti T	530 Nm	$27 * 19,8 \text{ Nm} = 530 \text{ Nm}$
Jännite U_N	400 V	400 V
Hyötysuhde %	93,7 %	86,7 %
Hankintahinta	13 995 €	$27 * 1158,16\text{€} = 31\,270 \text{ €}$

Käyttö vuodessa	2 920 h	2920 h
Energiakustannus vuodessa	15 597 €	$27 * 919,39 \text{ €} = 25\,110 \text{ €}$
Energia käyttö vuodessa	174 908 kWh	$27 * 10220 \text{ kWh} = 275\,940 \text{ kWh}$
Energiansäästö vuodessa	100 256 kWh	
	91 14,2 €	

Tilaajan arvion mukaan surffaussovellukseen tarvitaan noin 55-kW tehoa. Taulukkoon 4 on koottu ABB:n kahdesta eritehoisesta oikosulkumoottorista. Iso moottori on teholtaan 55-kW ja pieni moottori 3-kW. Nämä moottorit on valittu tilaajan vaatimuksen mukaan ja on selvitettävä, että kumpi näistä tulee edullisemmaksi.

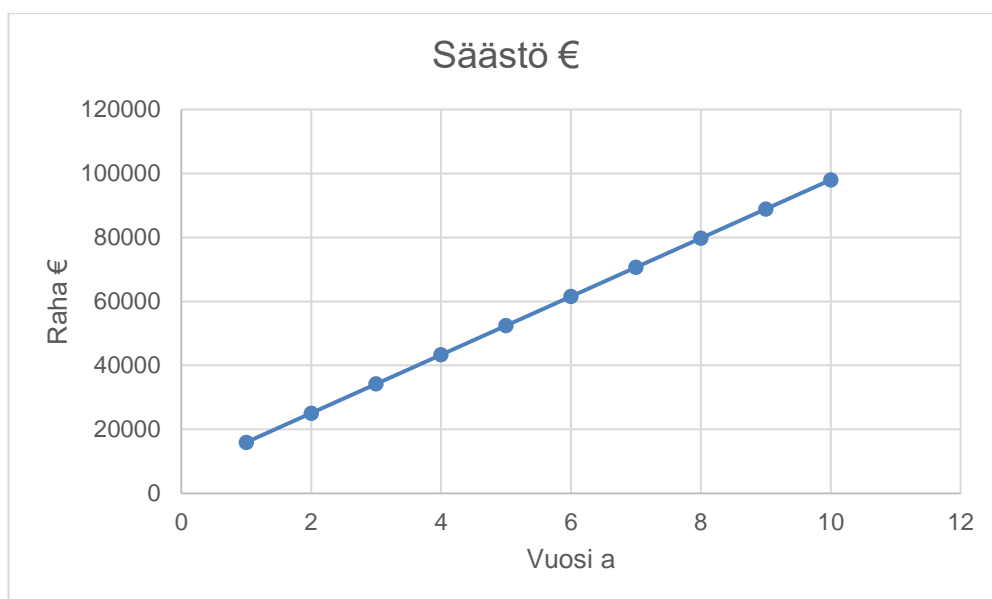
Taulukosta 4 havaitaan, että 27 kpl 3-kW oikosulkumoottoria maksaa 31 270€ ja 55-kW 13 955€. Hankinnan hintaero on noin 17 315€. Vuodessa 55 kW oikosulkumoottori kuluttaa 174 908 kWh ja vastaavasti 27 kpl 3-kW 275 940kWh. 55 kW oikosulkumoottorilla saavutetaan noin 100256 kWh hyöty 3-kW oikosulkumoottoriin nähden. 55-kW tehoisen oikosulkumoottorilla säästetyt energiat ovat merkittäviä. Kuvassa 12 on esitetty kahden moottorin kustannuserot.



Kuva 12. 55 kW-moottorin kustannusero 3-kW-moottoriin nähden.

Elinkaarikustannuksesta valtaosa koostuu energian käytöstä. Mikäli moottorin käyttö on enemmän tai vähemmän jatkuvaa, on syytä tarkastella korkeammalla hyötysuhteella toimivan moottorin hankkimalla saavutettavia kustannussäästöjä.

55-kW-oikosulkumoottorin hyötysuhde on seitsemän prosenttiyksikköä parempi kuin 3 kW-oikosulkumoottorin. Kuvasta 13 huomataan, että 55-kW-oikosulkumoottorin seisemän prosenttiyksikön parempi hyötysuhde vaikuttaa energiankustannukseen vuodessa noin 9114 ja kymmenen vuoden jälkeen säästetään 100 000 €. Lisäksi yhden moottorin huolto- ja ylläpitokustannukset ovat todennäköisesti halvemmat 27 moottorilla.



Kuva 13. 55kW moottorilla saavutettu säästö 3-kW moottorin nähden

11 Yhteenveto

Tässä insinöörityössä kartoitettiin eri valmistajien moottoreita ja taajuusmuuttajia. Teoriaosuudessa käytiin läpi moottoreiden ja taajuusmuuttajien olennaisia toimintaperiaatteita. Työssä kerrottiin hyötysuhteen merkityksestä ja vertailtiin VEM:n energy saving calculator -ohjelmalla moottoreita, joilla oli eri hyötysuhteet sekä käytiin läpi IP-luokitusta sekä kaapelointia.

Tehtyjen laskelmien perusteella ABB:n oikosulkumoottorit osoittautuivat paremmiksi vaihtoehtoiksi verrattuna VEM:n oikosulkumoottoreihin. Merkittävin ABB:n oikosulkumoottorien tarjoama etu on parempi hyötysuhde kuin VEM:n oikosulkumoottoreissa, kuten lasketun kustannusvertailun tulokset osoittivat.

Työssä tutkittiin ABB:n ACS880-sarjan taajuusmuuttajaa ja Danfossin VACON 100 INDUSTRIALa. Molemmat taajuusmuuttajat soveltuvat hyvin tällaiseen sovellukseen. ABB:n ACS880-sarjan momentinsäädön (DTC) ansiosta pystytään ohjaamaan lähes mitä tahansa sovellusta ja prosessia, mutta DTC tekee taajuusmuuttajasta kalliimman.

Tässä työssä käsiteltiin kustannuseroa käytettäessä kahden eri teholuokan oikosulkumoottorien välillä. Oikosulkumoottorin hyötysuhde paranee tehon kasvaessa. Tehtyjen laskujen perusteella havaittiin, että 55-kW:n oikosulkumoottori tulee edullisemmaksi kuin 27 kpl 3-kW:n oikosulkumoottori.

Aihe oli mielenkiintoinen ja opin paljon uusia asioita niin oikosulkumoottorista kuin taajuusmuuttajista. Vaikein osuus oli sovelluksen tehon laskeminen, koska projekti on vielä suunnitteluvaiheessa. Kun projektin suunnitelmat konkretisoituvat voidaan projektin laskelmat tehdä tarkemmin. Jälkikäteen ajattelen, että olisin voinut tutkia muita moottorivaihtoehtoja, kun tässä työssä keskityin pääasiassa oikosulkumoottoreihin.

Lähteet

- 1 Andrei Schavoronkoffin. 2017 Wakesurffaus. Dokumentti. Luettu 20.7.2017
- 2 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja Sähkökoneet. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 3 Karppinen Jukka. 2015 Sähkökoneet. 02Sko Dc koneet, luontomateriaalia Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 5 Sähkökoneet, osa 1. Verkkoaineisto. Leenakorpinen.fi <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf>. Luettu 15.7.2017.
- 6 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 7 Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetty sähkö-moottorikäytöt. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 8 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 9 ABB:n teollisuustaajuusmuuttajat ACS880-taajuusmuuttajat 0,55-3200 kW tuoteluettelo. Verkkoaineisto. <<http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000124140&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>>. Luettu 22.8.2017.
- 10 ABB:n vakiotajuusmuuttajat ACS580-taajuusmuuttajat 0,75-250 kW tuoteluettelo. Verkkoaineisto. <<http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000173668&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>>. Luettu 22.8.2017.
- 11 slo. <<https://www.slo.fi/slo/fi/products/layouts/15/slo/productdetails.aspx?partno=3804153>>. Luettu 2.10.2017.
- 12 VACON 100-taajuusmuuttajat, Verkkoaineisto. <<http://drivesliterature.danfoss.com/showDetails.action?doctype=TLI&docid=0000000000000030000006787&version=A1&language=FI#>>. Luettu 21.8.2017.
- 13 slo. <<https://www.slo.fi/slo/fi/products/layouts/15/slo/productdetails.aspx?partno=3888275>>. Luettu 2.10.2017.

- 14 SFS-EN 605229 +A1 +A2 sähkölaitteidenkotelointiluokat. Verkkoaineisto. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/2051?search=sfs%20en%2060529>>. Luettu 15.8.2017.
- 15 D1-2012. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Sähköinfo Oy.
- 16 Sähkötieto ry. ST21.32. sähköinfo OY. verkkoaineisto. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/3975?search=st%2021.32>>. Luettu 11.8.2017.
- 17 Energy saving calculator. VEM:n. <http://www.vem.fi/>. < https://www.vem-group.com/en/products-services/low-voltage/energy-saving-calculator.html?tx_vemcalculator_vemcalculator%5Bcontroller%5D=Calculator&cHash=f09673d714f85df740d35c98d5d5cf76#analysis>. Luettu 10.8.2017
- 18 raxel. <<http://e-cata86208log.rexel.fi/67/>>. Luettu 21.7.2017.
- 19 raxel. <<http://e-catalog.rexel.fi/8623438/>>. Luettu 21.07.2017.
- 20 Hinnasto 2017. Verkkoaineisto. <http://www.vem.fi/userData/vem/downloads/vem-motors-fi/hinnasto/VEM-hinnasto-2017-netti.pdf>. Luettu 21.07.2017.
- 21 <https://www.helen.fi/sahko/yritykset/sahkotuotteet-yritykselle/> [luettu 26.7.2017]
- 22 ABB:n teollisuustaajuusmuuttajat ACS880-taajuusmuuttajat 0,55-3200 kW tuoteluettelo. Verkkodokumentti www.abb.fi <<http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000124140&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>>. Luettu 22.8.2017.
- 23 ABB:n vakiotajuusmuuttajat ACS580-taajuusmuuttajat 0,75-250 kW tuoteluettelo. Verkkodokumentti www.abb.fi < <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000173668&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>>. Luettu 22.8.2017.
- 24 Vacon NXS verkkodokumentti. <<http://www.stmfinland.fi> < <http://www.stmfinland.fi/tuotteet/taajuusmuuttajat/vacon/vacon-nxs>>. Luettu 21.8.2017.
- 25 ABB standard drive ACH550-srajan taajuusmuuttajat talotekniikan sovelluksille, 0,78-366kW. Verkkoaineisto. < <http://www.lsk.fi/globalassets/tuotteet/taajuusmuuttajat/talotekniikka/abb/rakennusautomaatio.pdf>>. Luettu 1.8.2017
- 26 ABB:n pienjännitemoottorit. 2014. Verkkoaineisto. < http://cna.mamk.fi/Public/FJAK/YAMK/Sahkokaytto/Materiaalit/ABBn%20moottorikoulutusmateriaali_10%202014.pdf>. Luettu 22.10.2017.

- 27 ABB:n nopeussäädettyjen käyttöjen opas. Verkkoaineisto. <https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen_opas_nro4.pdf>. Luettu 18.9.2017.
- 28 Heikki Tuusa. 11 Sähkömoottorikäytöt. Verkkoaineisto. <http://www.leenakorpi-nen.fi/archive/svt_opus/11sahkomoottorikaytot.pdf>. Luettu 18.11.2017.
- 29 Energiateollisuus ry 2016. verkkoaineisto. <https://energia.fi/ajankoh-taista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot>. Luettu 10.1.2018.